

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผลการทดสอบ

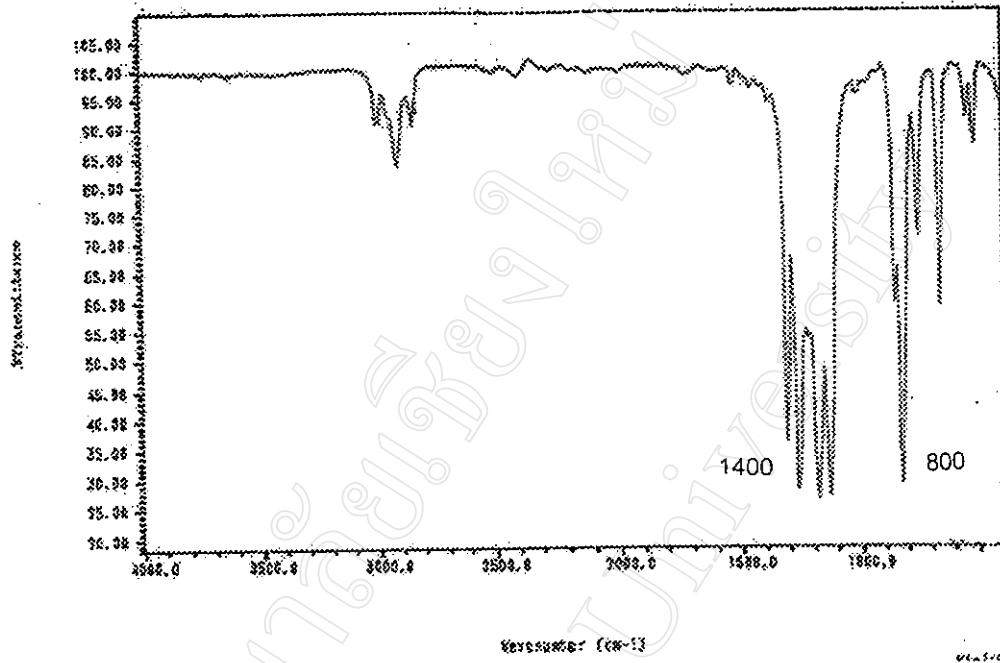
ผลการทดสอบจะกล่าวถึงลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของเทอร์โมโซฟอน และความแตกต่างทางด้านการทนต่อแรงดึงของชั้นทดสอบเอชดีพีอี โดยสามารถอธิบายผลการทดสอบได้ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของเทอร์โมโซฟอน

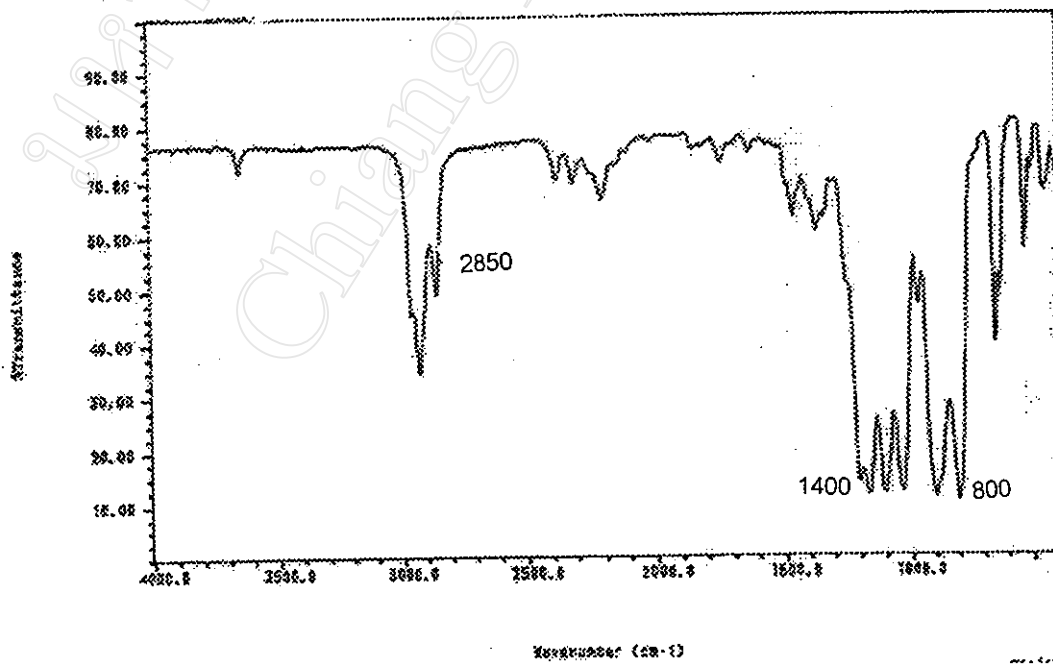
ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาของเทอร์โมโซฟอน จะเป็นผลมาจากหลายปัจจัยเช่น เวลาที่ทำการทดสอบ อุณหภูมิการทดสอบ ชนิดของวัสดุทำงานและวัสดุท่อที่เลือกใช้ ซึ่งสามารถศึกษาได้โดยวิเคราะห์สารทำเย็นด้วยเครื่อง Infrared Spectroscopy (IR) และเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) วิเคราะห์ความแตกต่างเชิงมวลของชั้นทดสอบเอชดีพีอี และดูลักษณะพื้นผิวของเทอร์โมโซฟอนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสแกน (Scanning Electron Microscope)

4.1.1 การวิเคราะห์สารทำเย็นด้วยเครื่อง Infrared Spectrometer (IR)

จากการใช้เครื่อง IR วิเคราะห์สารทำเย็นที่เวลาทำงาน 500 1000 และ 3000 ชั่วโมง รูป 4.1 และ 4.2 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของสารทำเย็น R113 และ R123 ก่อนเริ่มต้นการทดลอง ตามลำดับ จะเห็นว่าอินฟราเรดสเปกตรัมมีลักษณะเป็นยอดแหลมชี้ลง โดยที่ยอดแหลมแต่ละยอดจะแสดงชนิดของพันธะแต่ละชนิดซึ่งจะมีคุณสมบัติในการส่งผ่านพลังงานที่ความยาวคลื่นต่างกัน ดังแสดงรายละเอียดของพันธะและชนิดของการสั่นในตาราง 4.1 และ 4.2 สำหรับสารทำเย็น R113 และ R123 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสารทำเย็น R113 ประกอบไปด้วยพันธะ C-Cl C-C และ C-F ในขณะที่สารทำเย็น R123 ประกอบไปด้วยพันธะ C-Cl C-C C-H และ C-F ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของสาร ดังที่ได้แสดงในรูป 4.1 และ 4.2



รูป 4.1 อินฟราเรดสเปกตรัม ของสารทำเย็น R113 บริสุทธิ์



รูป 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัม ของสารทำเย็น R123 บริสุทธิ์

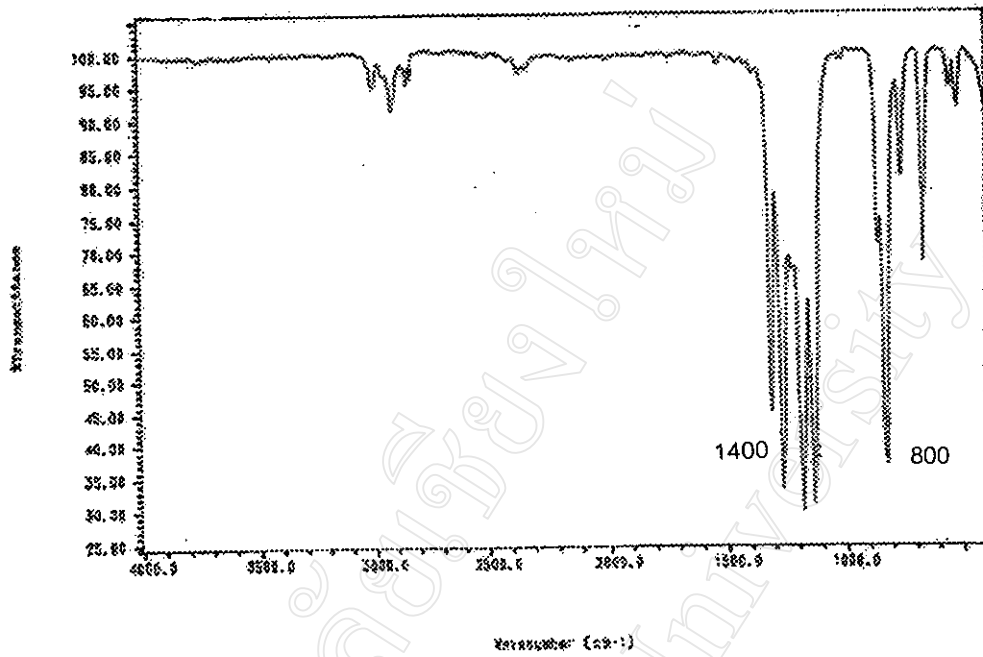
ตารางที่ 4.1 เลขคลื่นของการดูดกลืนรังสี IR ของสารทำเย็น R113 มีดังนี้

สารประกอบ	เลขคลื่น (cm^{-1})	พันธะและชนิดของการสั่น
R113	800	C-Cl Stretching
	600-1500	C-C Stretching
	1400	C-F Stretching

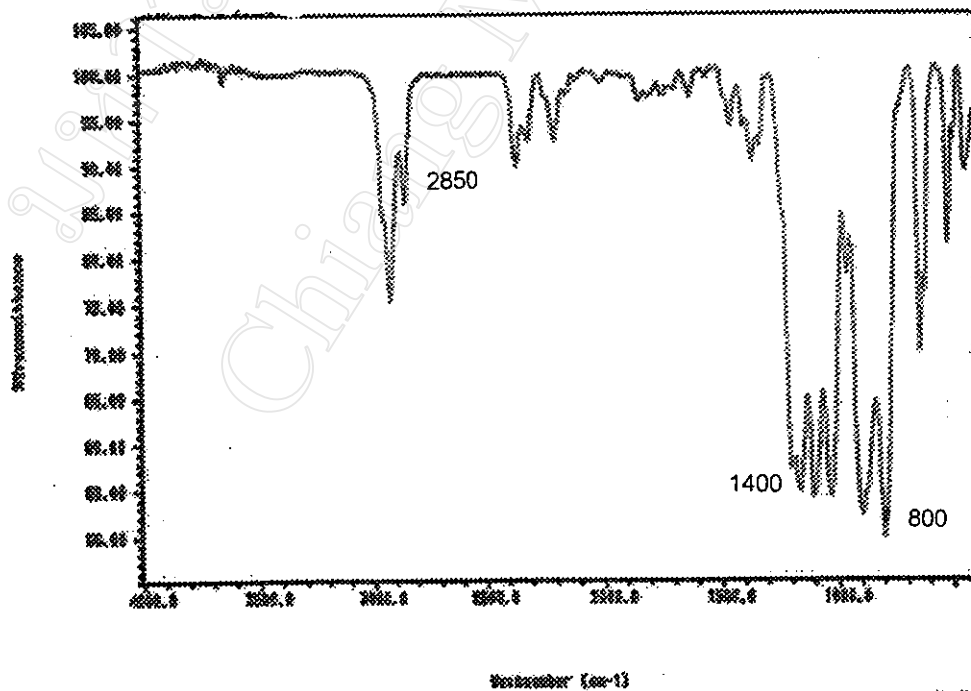
ตาราง 4.2 เลขคลื่นของการดูดกลืนรังสี IR ของสารทำเย็น R123 มีดังนี้

สารประกอบ	เลขคลื่น (cm^{-1})	พันธะและชนิดของการสั่น
R123	800	C-Cl Stretching
	600-1500	C-C Stretching
	1400	C-F Stretching
	2850	C-H Stretching

รูป 4.3 และ 4.4 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของสารทำเย็น R113 และ R123 เมื่อผ่านการทดสอบในท่อเทอร์โมไซฟอนที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3000 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบยอดแหลมของพันธะหลักๆของสารทำเย็น ที่ปรากฏในอินฟราเรดสเปกตรัม พบว่า ตำแหน่งของยอดแหลมของพันธะหลักๆของสารทำเย็นทั้ง 2 ชนิดดังกล่าวที่ปรากฏออกมายังมีอยู่ครบ แม้จะมีตำแหน่งและความเข้มของยอดแหลมที่แตกต่างกันแต่ก็ยังอยู่ในช่วงความถี่หรือเลขคลื่นที่ยอมรับได้ (พิมล เรียนวัฒนา, 2526) ซึ่งตำแหน่งและความเข้มของยอดแหลมอาจจะแตกต่างไปบ้างเล็กน้อยในการบันทึกอินฟราเรดสเปกตรัมแต่ละครั้ง ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเตรียมสารสำหรับบันทึกอินฟราเรดสเปกตรัม เพราะสารทำเย็นที่นำมาวิเคราะห์มีจุดเดือดต่ำ ($R113 = 47.56^{\circ}\text{C}$, $R123 = 27.84^{\circ}\text{C}$) และสามารถระเหยตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิทำงานของเครื่อง IR ดังนั้น จึงไม่สามารถควบคุมปริมาณสารตัวอย่างในการวิเคราะห์ IR ให้เท่ากันทุกครั้งที่ทำการทดสอบได้ ตำแหน่งและความเข้มของยอดแหลมที่ปรากฏออกมาจึงแตกต่างกัน แต่การพิจารณาว่าสารตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ จะพิจารณาที่ตำแหน่งเลขคลื่นของพันธะหลักของสารตัวอย่างว่าอยู่ในช่วงเลขคลื่นที่ยอมรับได้หรือไม่เท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปจากอินฟราเรดสเปกตรัมของสารทำเย็นทั้ง 2 ชนิดได้ว่าไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของตำแหน่งและความเข้มของยอดแหลมของสารทำเย็น R113 และ R123 นั่นคือ พันธะทางเคมีของสารทำเย็น 2 ชนิดดังกล่าวไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อทำงานที่เวลา 3000 ชั่วโมง และอุณหภูมิทำงานไม่เกิน 80°C ส่วนผลการทดสอบที่สถานะการทดสอบอื่นๆ ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน



รูป 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารทำเย็น R113 ที่ผ่านการทดสอบที่เวลา 3000 ชั่วโมงและอุณหภูมิทำงาน 80 °C



รูป 4.4 อินฟราเรดสเปกตรัม ของสารทำเย็น R123 ที่ผ่านการทดสอบที่เวลา 3000 ชั่วโมงและอุณหภูมิทำงาน 80 °C

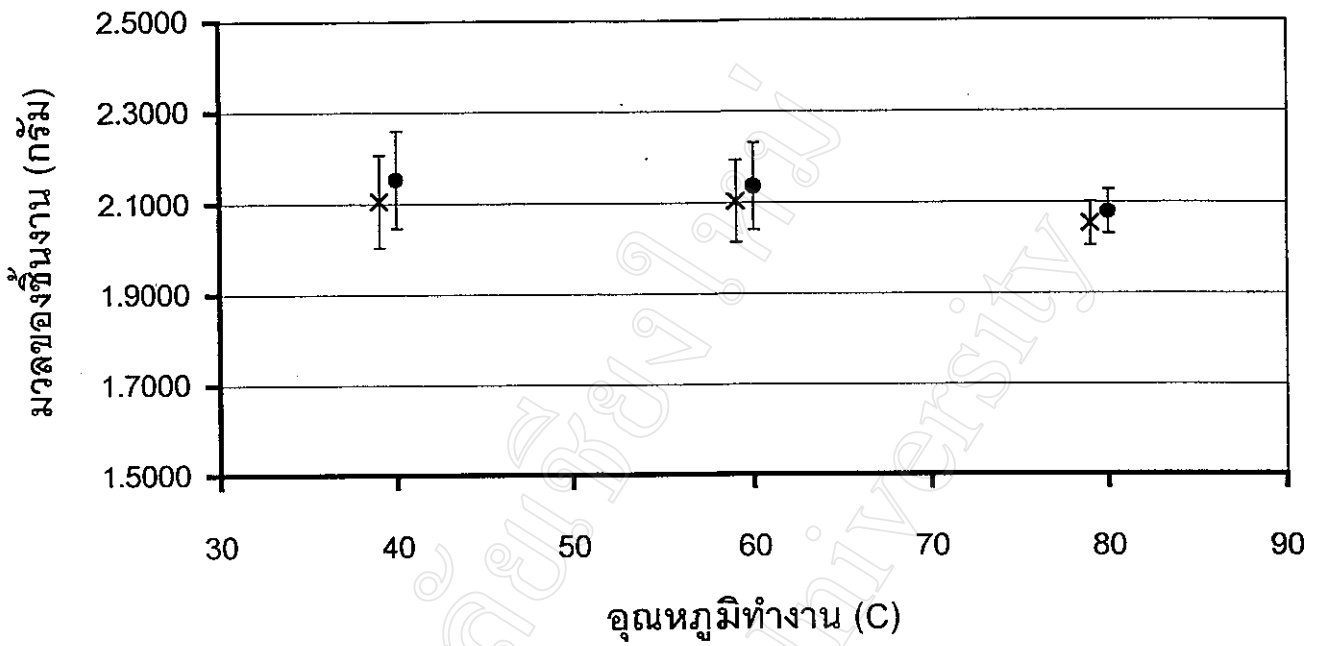
4.1.2 การวิเคราะห์สารทำเย้นด้วยเครื่อง Atomic Absorption spectrometer (AAS)

เนื่องจากพบว่า สารทำเย้นภายในท่อทั้ง 2 ชนิดที่ผ่านการทดลองมาแล้ว 500 1000 และ 3000 ชั่วโมง มีสีเหลืองใสที่ทุกๆ อุณหภูมิการทดสอบ โดยที่อุณหภูมิสูงจะมีสีเหลืองเข้มกว่า และจากการทดสอบโดยใช้เครื่อง IR ไม่ปรากฏสารอินทรีย์อื่นๆ ขึ้นมา จึงทำการวิเคราะห์สารดังกล่าวด้วยเครื่อง Atomic Absorption spectrometer เพื่อหาสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในสารทำเย้น ปรากฏพบธาตุทองแดงอยู่ในสารทำเย้น R113 ที่เวลา 500 1000 และ 3000 ชั่วโมง อยู่เป็นปริมาณ 0.372 0.389 และ 0.412 ppm ตามลำดับ ขณะที่ในสารทำเย้น R123 พบธาตุทองแดงอยู่เป็นปริมาณ 3.271 11.520 และ 15.341 ppm ตามลำดับ

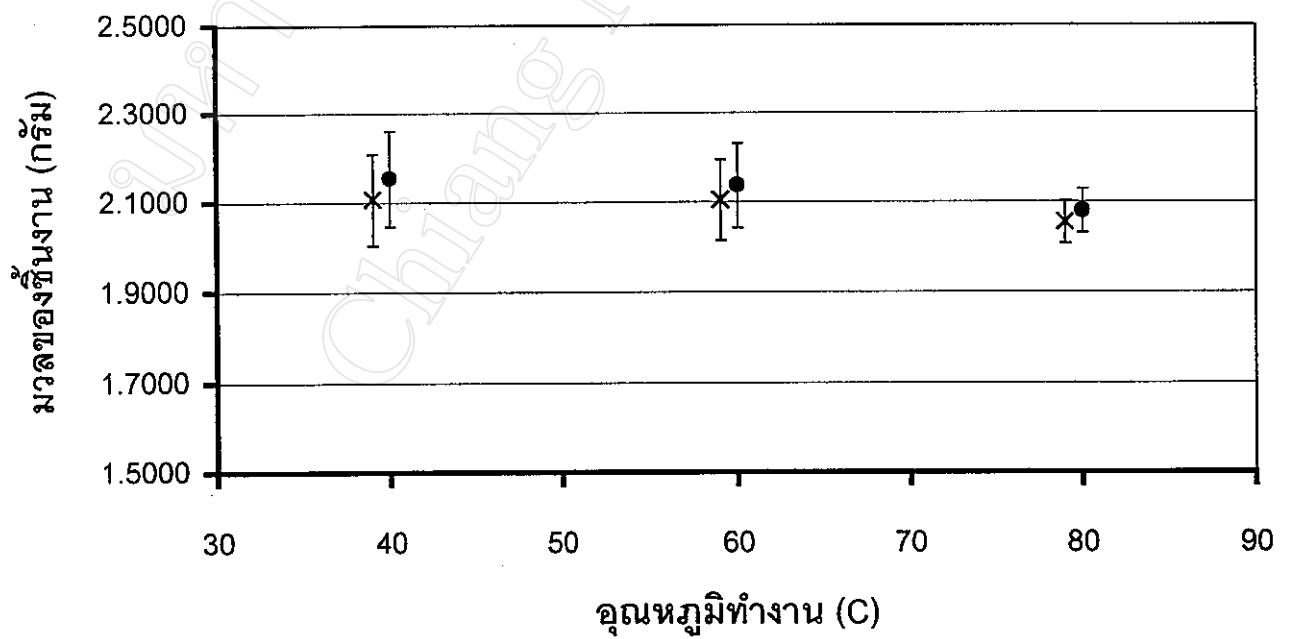
จึงสรุปได้ว่าสารทำเย้นที่ปรากฏเป็นสีเหลืองใส นั้น เป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างสารทำเย้นทั้งสองกับท่อทองแดงที่ใช้เป็นชุดเดิมสารทำเย้นที่ประกอบไว้ด้านบนสุดของท่อ ไม่ใช่เป็นผลมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างวัสดุท่อกับสารทำเย้น เนื่องจากวัสดุท่อซึ่งคือท่อ HDPE นั้นไม่มีธาตุทองแดงเป็นองค์ประกอบ โดยเมื่ออุณหภูมิทำงานเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาระหว่างสารทำเย้น R113 และ R123 กับท่อทองแดงจะเกิดมากขึ้น และ R123 จะทำปฏิกิริยาเคมีได้มากกว่า สังเกตได้จากปริมาณธาตุทองแดงที่ออกมาเจือปนอยู่ในสารทำเย้นนั่นเอง

4.1.3 ความแตกต่างเชิงมวลของชั้นทดสอบ HDPE

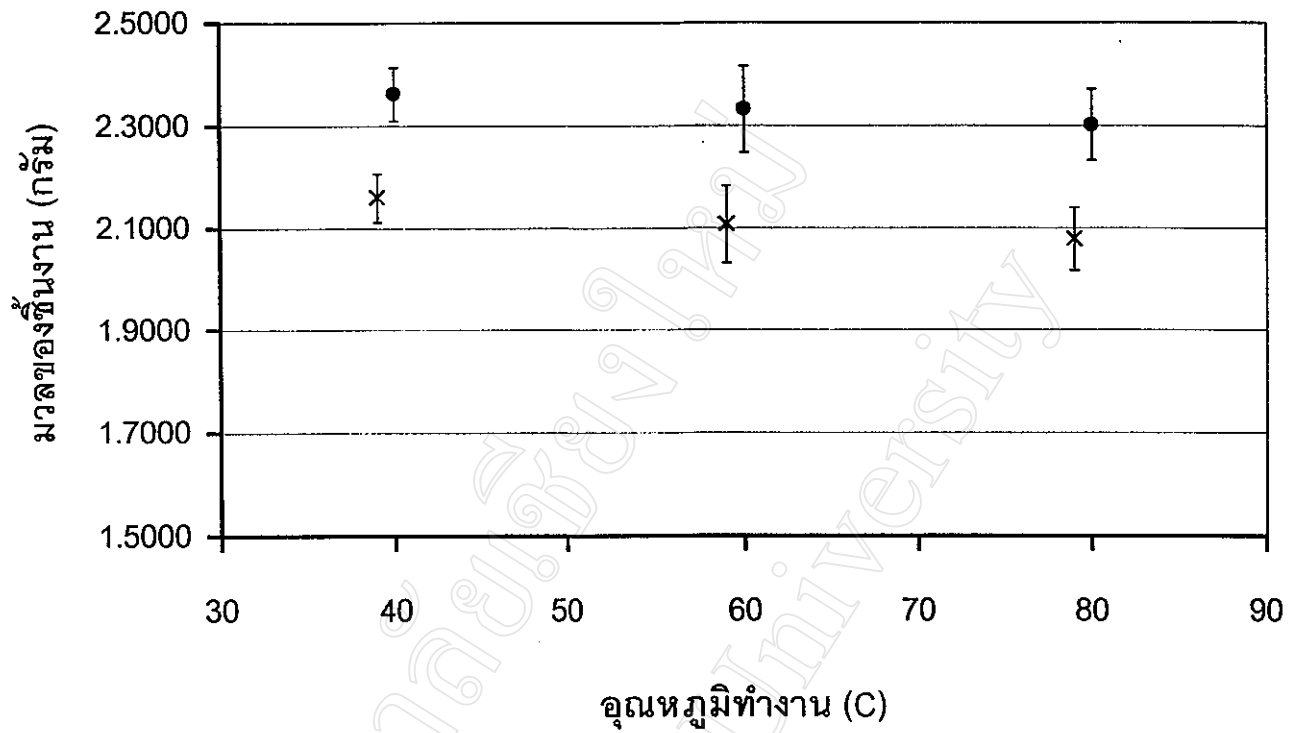
รูป 4.5 – 4.10 แสดงมวลของชั้นทดสอบที่ทุกๆอุณหภูมิการทำงาน ที่เวลา 500 1000 และ 3000 ชั่วโมง ที่ใช้ในสารทำเย้น R113 และ R123 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ชั้นทดสอบทุกชั้นมีมวลเพิ่มขึ้น ที่ทุกๆอุณหภูมิทดสอบ โดยมวลชั้นทดสอบที่เพิ่มขึ้นที่ระยะเวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากเมื่อเริ่มต้นการทดลอง แต่ที่ระยะเวลา 3000 ชั่วโมง มวลของชั้นทดสอบทุกชั้นเพิ่มขึ้นจากเดิมโดยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญจากเมื่อเริ่มต้นการทดลอง



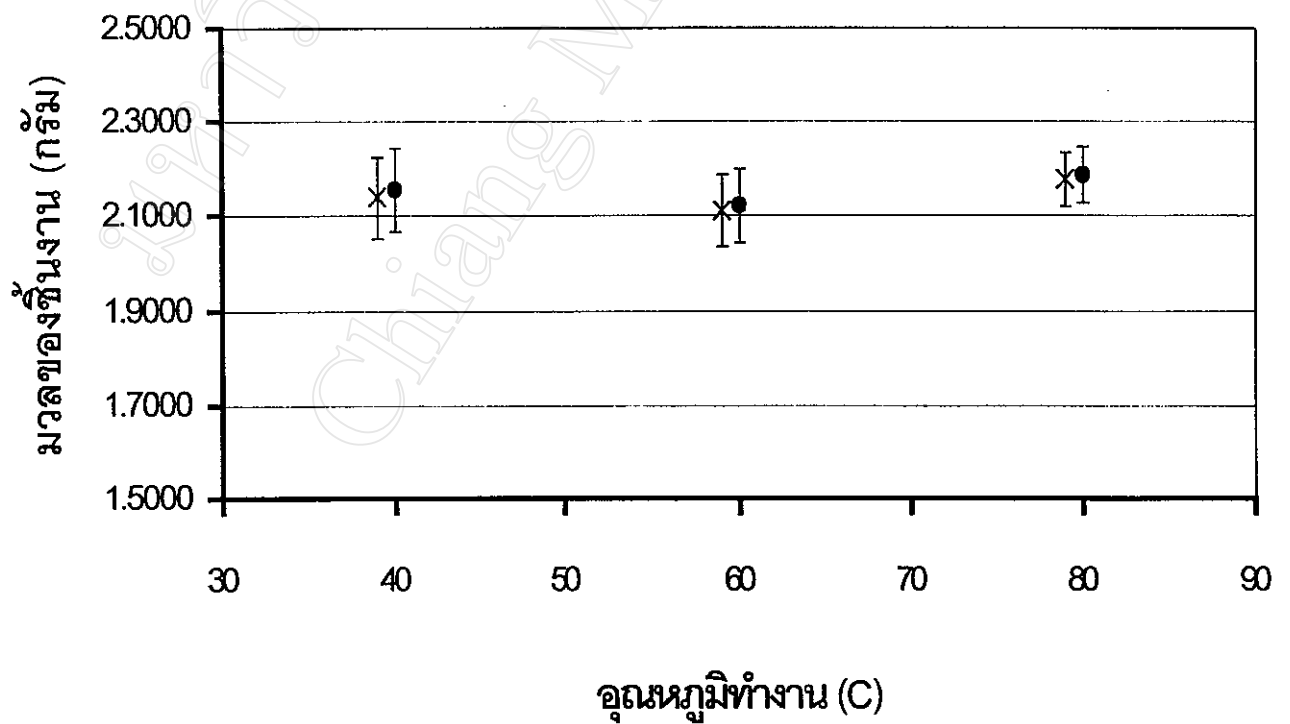
รูป 4.5 มวลของรีฟริจันที่แช่ใน R113 ที่เวลา 500 ชั่วโมง



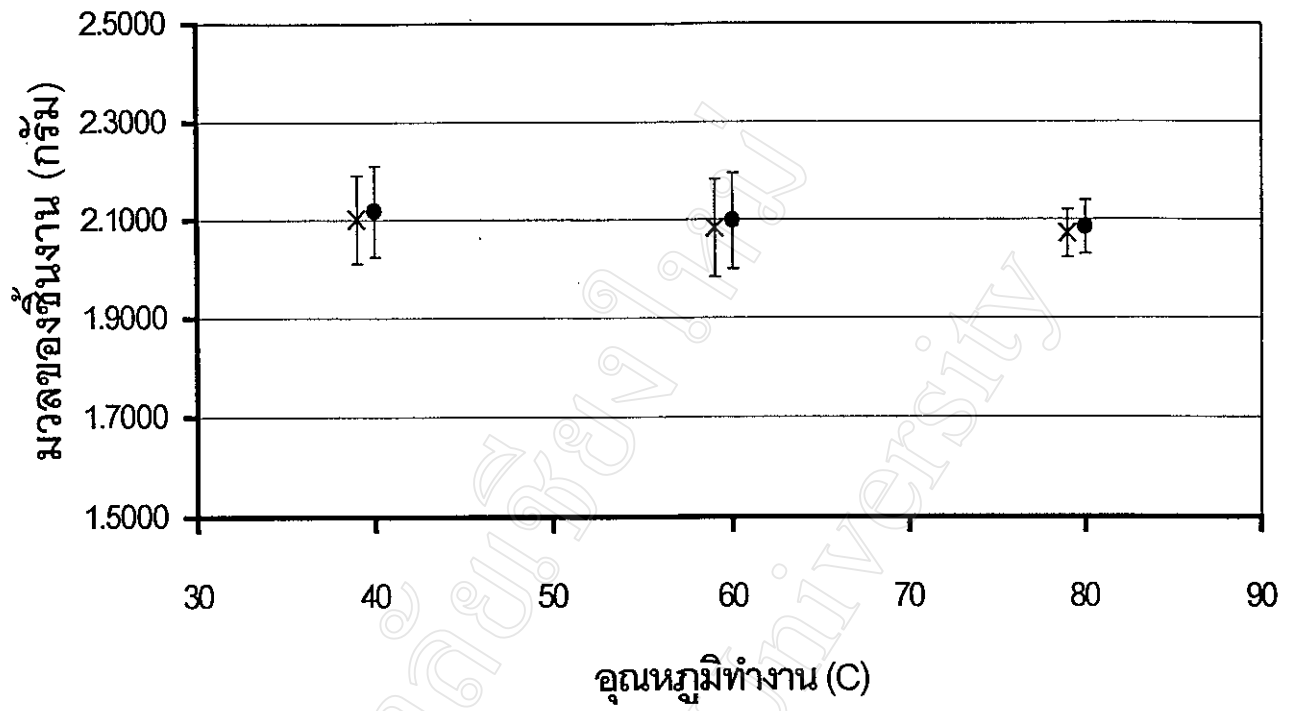
รูป 4.6 มวลของรีฟริจันที่แช่ใน R113 ที่เวลา 1000 ชั่วโมง



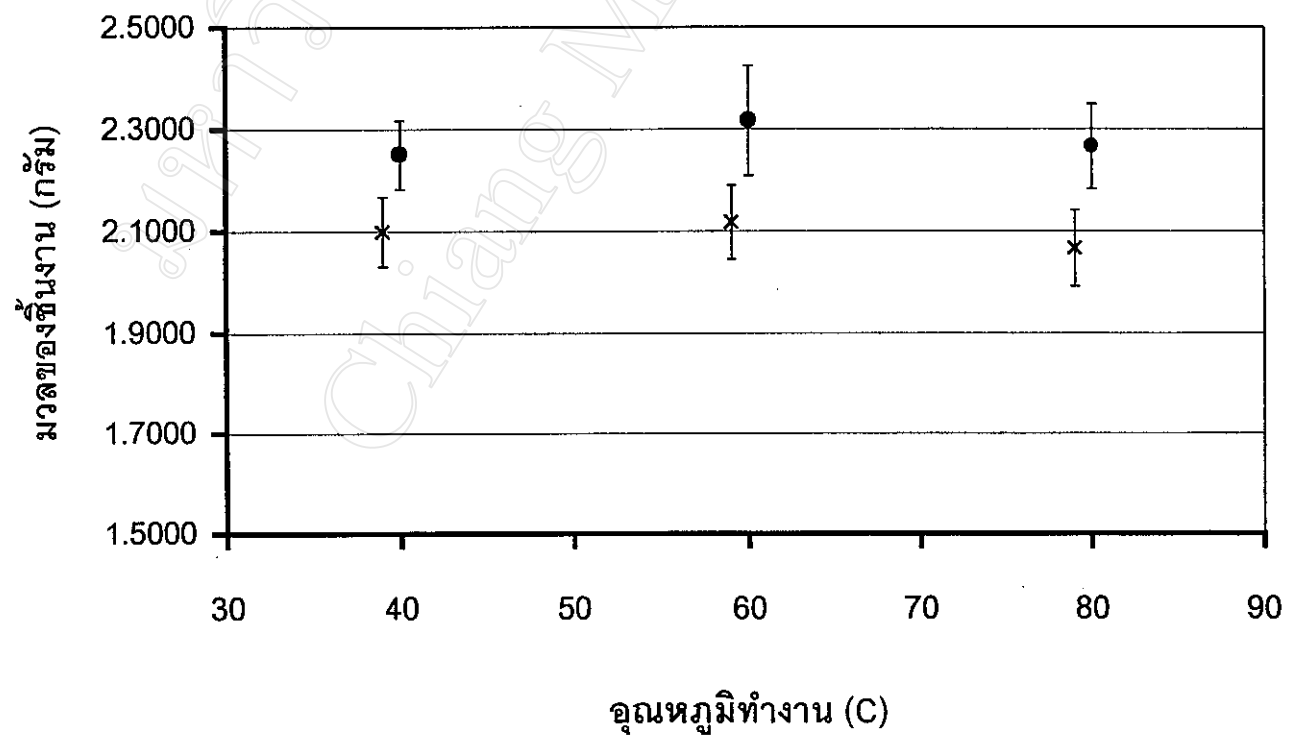
รูป 4.7 มวลของชิ้นทดสอบที่แช่ใน R113 ที่เวลา 3000 ชั่วโมง



รูป 4.8 มวลของชิ้นทดสอบที่แช่ใน R123 ที่เวลา 500 ชั่วโมง



รูป 4.9 มวลของชั้นทดสอบที่แช่ใน R123 ที่เวลา 1000 ชั่วโมง



รูป 4.10 มวลของชั้นทดสอบที่แช่ใน R123 ที่เวลา 3000 ชั่วโมง

4.1.3.1 ผลของเวลาและอุณหภูมิทดสอบที่มีต่อมวลของชั้นทดสอบ HDPE

รูป 4.11 และ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลต่างของมวลชิ้นงานที่อุณหภูมิและเวลาทำงานต่างๆ ที่ใช้ในสารทำเย้น R113 และ R123 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ผลต่างของมวลชิ้นงานมีค่าเป็นศูนย์ที่เวลาดังแต่เริ่มต้นการทดลองจนกระทั่งถึง 1000 ชั่วโมง ในขณะที่เวลา 3000 ชั่วโมง ค่าเปอร์เซ็นต์ผลต่างของมวลจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าที่เพิ่มขึ้นจะแปรผันไปตามค่าอุณหภูมิการทำงาน มวลของชิ้นทดสอบที่เพิ่มขึ้นเกิดขึ้นเนื่องจากค่าตัวเลขที่บอกถึงความสามารถในการละลาย (Solubility Parameter, δ) (Richard C. Progelhof, 1993) ของสารทำเย้น R113 และ R123 กับพลาสติกชนิดเอชดีพีอี มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยที่ค่า δ ของสารทำเย้นทั้ง 2 ชนิดและพลาสติกชนิดเอชดีพีอี มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตาราง 4.3 แสดงค่าความสามารถในการละลายของสารทำเย้นและพลาสติกชนิดเอชดีพีอี (Richard C. Progelhof, 1993)

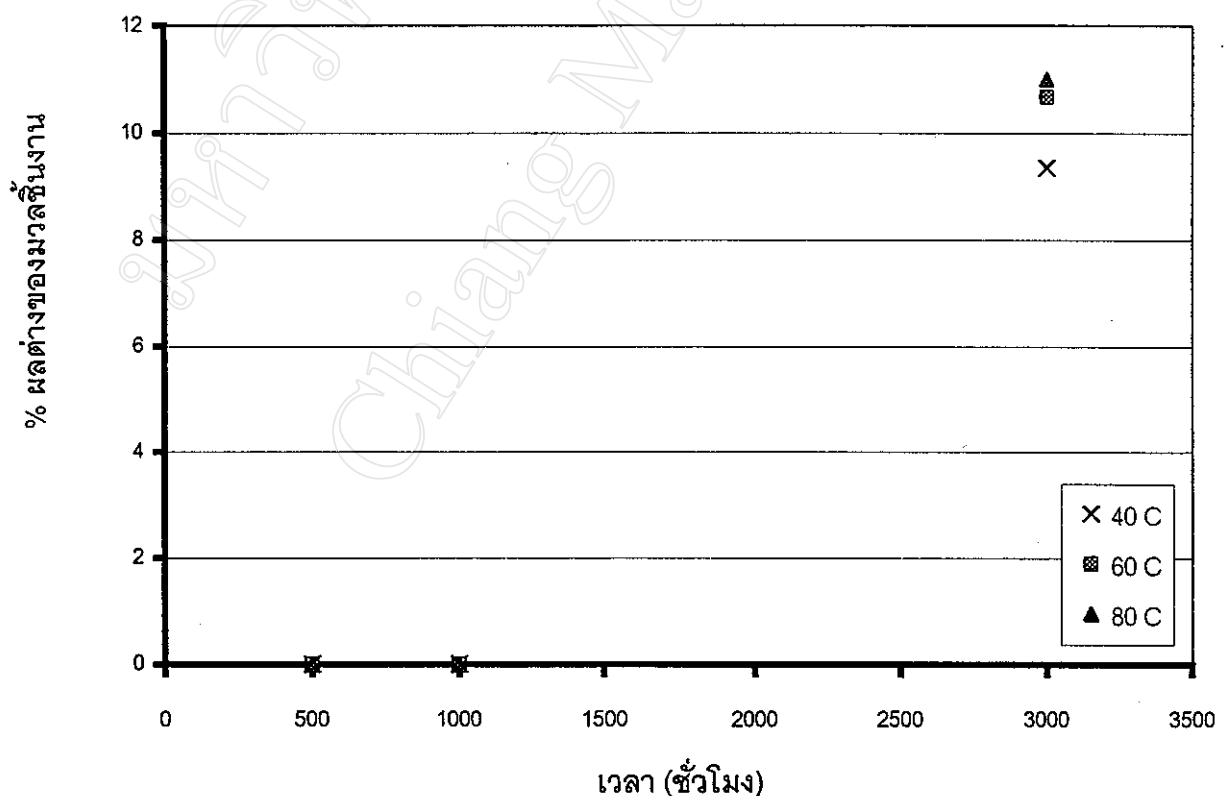
พลาสติก / สารทำเย้น	Solubility Parameter, δ
เอชดีพีอี	7.8-8.1 (J/cm ³) ^{1/2}
R113	14.1 (J/cm ³) ^{1/2}
R123	14.9 (J/cm ³) ^{1/2}

หากค่า δ ของคู่สารทำเย้นและพลาสติกชนิดเอชดีพีอีอยู่ในช่วง ± 6.3 (J/cm³)^{1/2} (Richard C. Progelhof, 1993) การละลายจะสามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากแรงกระทำระหว่างสารทำเย้นกับเอชดีพีอีมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุล ซึ่งจะละลายได้มากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับความแตกต่างของค่า δ ของคู่สารทำเย้นและเอชดีพีอี หากแตกต่างกันน้อยการละลายก็จะเกิดมาก แต่ถ้าค่า δ ของสารทำเย้นแตกต่างจากของเอชดีพีอีนอกช่วงดังกล่าวจะเกิดแค่การดูดซึมโมเลกุลของสารละลายเข้าไปในช่องว่างรอบๆ โมเลกุลของโพลิเมอร์ ทำให้โพลิเมอร์เกิดการพองตัว (Swelling) และมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิสูงเปอร์เซ็นต์ผลต่างของมวลชิ้นงานจะมีค่ามากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ มวลของชิ้นทดสอบที่ใช้ใน R113 ที่ อุณหภูมิทำงาน 40 60 และ 80 °C เพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 9.34 10.66 และ 10.76 ตามลำดับ ในขณะที่ชิ้นทดสอบที่ใช้ใน R123 มีมวลเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 7.15 9.41 และ 9.68 ตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง เส้นสายโมเลกุลของเอชดีพีอีจะมีพลังงานมากขึ้น ทำให้มีความสามารถขยับตัว (Mobility) ของลูกโซ่โพลิเมอร์เพิ่มขึ้น ไปเพิ่มช่องว่างของปริมาตรอิสระ จึงทำ

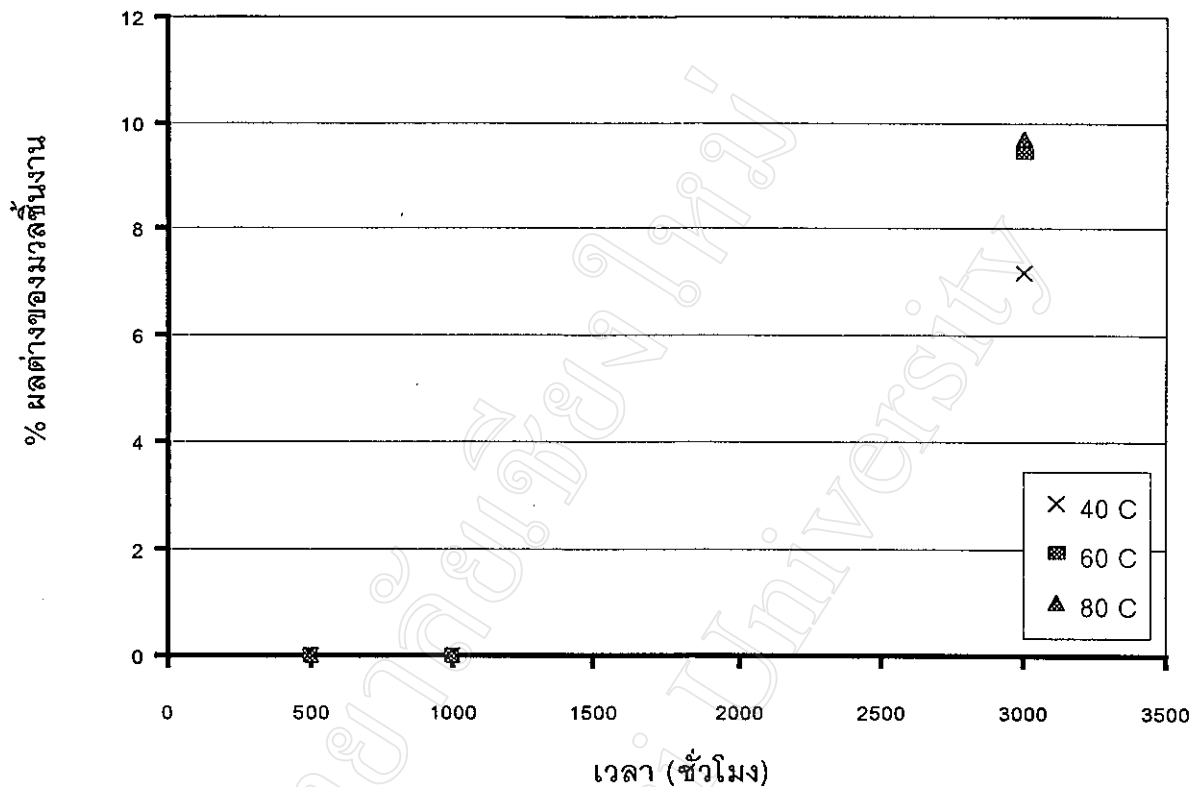
ให้สารทำเย้นสามารถแพร่กระจายเข้าไปในปริมาตรอิสระได้ง่ายกว่า ดังนั้น มวลชิ้นงานที่อุณหภูมิสูงจึงเพิ่มขึ้นมากกว่า

4.1.3.2 ผลของสารทำเย้นที่มีต่อมวลชิ้นทดสอบ

เมื่อเปรียบเทียบมวลชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นระหว่างที่แช่ในสารทำเย้น R113 และ R123 จะเห็นได้ว่าชิ้นทดสอบที่แช่ใน R113 จะมีมวลเพิ่มขึ้นมากกว่าที่แช่ใน R123 ที่ทุกๆ อุณหภูมิ เนื่องจากการคำนวณค่า δ ของ R113 และ R123 พบว่ามีค่า 14.1 และ 14.9 (J/cm³)^{1/2} ตามลำดับ ในขณะที่ค่า δ ของ HDPE มีค่าเท่ากับ 7.9-8.1 (J/cm³)^{1/2} การซึมผ่านของสารทำเย้นเข้าไปในเอชดีพีอีจึงเกิดขึ้นในปริมาณต่างกัน และจะเห็นได้ว่าค่า δ ของ R113 มีมากกว่าของ R123 แม้ว่าจะยังอยู่ในช่วง ± 6.3 (J/cm³)^{1/2} แต่เอชดีพีอีก็ยังไม่ละลายในสารทำเย้น R113 ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการผลิตเอชดีพีอีนั้นมีการเติมคาร์บอนแบล็ค (Carbon Black) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดการกัดกร่อน ดังนั้นจึงทำให้ R113 ไม่ละลายเอชดีพีอีและยังสามารถซึมผ่านโมเลกุลของ HDPE ได้มากกว่า R123 ดังจะเห็นได้จากมวลของชิ้นงานที่แช่ใน R113 สูงกว่าที่แช่ใน R123 ที่ทุกๆ อุณหภูมิและเวลาการทดสอบนั่นเอง



รูป 4.11 เปอร์เซนต์ความแตกต่างของมวลชิ้นงานที่แช่ใน R113 ที่เวลาและอุณหภูมิทำงานต่างๆ



รูป 4.12 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของมวลชิ้นงาน-R123 ที่เวลาและอุณหภูมิทำงานใดๆ

4.1.3 ลักษณะพื้นผิวภายในของเทอร์โมไซฟอน

จากรูป 4.13 แสดงลักษณะพื้นผิวภายในของเทอร์โมไซฟอน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบสแกนส่องที่ตำแหน่งกึ่งกลางและตำแหน่งขอบของชิ้นทดสอบ ไม่ปรากฏพบความแตกต่างใดๆที่เด่นชัดระหว่างเทอร์โมไซฟอนที่ผ่านการทดสอบที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ เนื่องจากพลาสติกชนิดเอชดีพีมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนจากสารเคมีได้ดี



(ก) ตำแหน่งขอบของชั้นทดสอบ
ก่อนการทดลอง



(ค) ตำแหน่งขอบของชั้นทดสอบ
หลังการทดลอง



(ข) ตำแหน่งกึ่งกลางของชั้นทดสอบ
ก่อนการทดลอง



(ง) ตำแหน่งกึ่งกลางของชั้นทดสอบ
หลังการทดลอง

รูป 4.13 ภาพถ่ายจากกล้อง Scanning Electron Microscope ของพื้นผิวภายในเทอร์โมไโซโฟน
ก่อนและหลังการทดสอบ ที่เวลาทำงาน 3000 ชั่วโมงและอุณหภูมิทำงาน 80 °C

4.2 ความแตกต่างทางของความแข็งแรงคราก (Yield Strength) ระหว่างชั้นทดสอบที่เข้าในสารทำเย็นและชั้นทดสอบที่ตัดจากท่อ

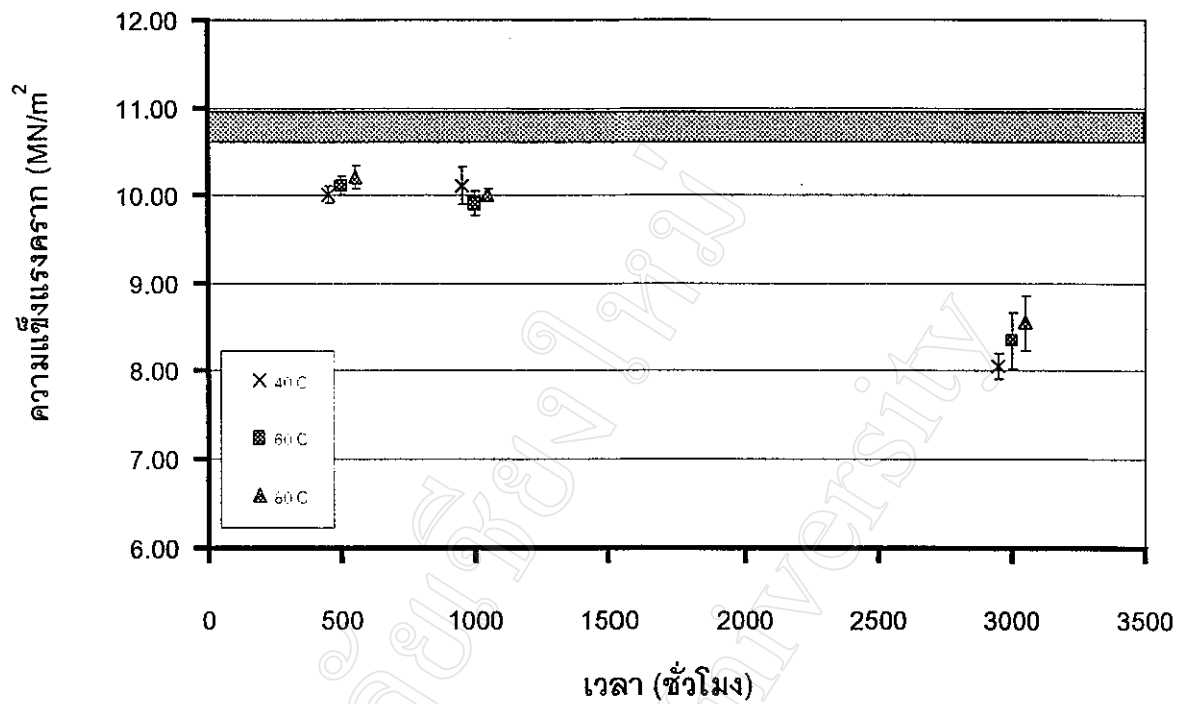
4.2.1 ชั้นทดสอบที่เข้าในสารทำเย็น

4.2.1.1 ผลของเวลาและอุณหภูมิทดสอบที่มีต่อค่าความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบ

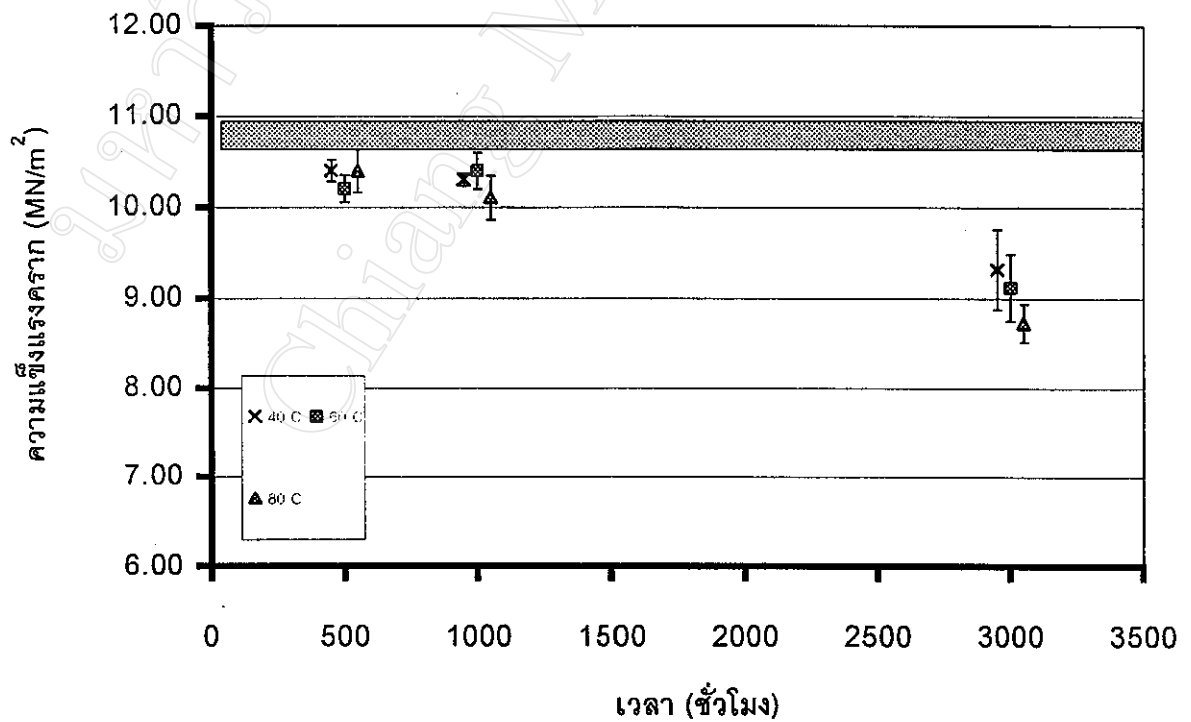
จากรูป 4.14 และ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบที่เวลาและอุณหภูมิทดสอบต่างๆ ที่เข้าในสารทำเย็น R113 และ R123 ตามลำดับ แถบสีที่แสดงเป็นช่วงความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบที่ไม่ได้เข้าสารทำงาน แต่ทำการทดสอบที่สภาวะและอุณหภูมิเดียวกับชุดการทดลองอื่น ซึ่งพบว่าในแต่ละอุณหภูมิทดสอบ ค่าความแข็งแรงครากของของชั้นทดสอบไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อพิจารณาความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบที่เข้าอยู่ในสารทำงาน จะเห็นได้ว่าความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบที่เวลา 500 และ 1000 ชั่วโมง ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามที่เวลา 3000 ชั่วโมง ความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบที่เข้าใน R113 และ R123 จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าลดลงประมาณ 17.00 และ 11.78% ตามลำดับ ดังนั้น อุณหภูมิไม่ได้มีผลต่อค่าความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบ แต่ปัจจัยที่ส่งผลต่อการลดลงของความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบ คือ เวลาการทดสอบ ค่าความเค้นของชิ้นงานที่ลดลงนี้เกิดจากการแพร่กระจายของสารทำเย็นเข้าไปในช่องว่างระหว่างโมเลกุลของเอชดีพีอี เนื่องจากสารทำเย็นทั้ง 2 ชนิดมีค่าความสามารถในการละลายอยู่ในช่วงที่จะสามารถซึมผ่านเข้าไปในเอชดีพีอีได้โดยไม่เกิดการละลาย โมเลกุลของสารทำเย็นจะไปแยกห่วงโซ่โมเลกุลเอชดีพีอีออกจากกัน ทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของเอชดีพีอีลดลงบางส่วน เกิดการ Plasticization ขึ้น (Richard C. Progelhof, 1993) ความแข็งแรงครากของเอชดีพีอีจึงลดลง

4.2.1.2 ผลของชนิดสารทำเย็นที่มีต่อค่าความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบ

จะเห็นว่าชั้นทดสอบที่เข้าใน R113 จะมีค่าความแข็งแรงครากต่ำกว่าชั้นทดสอบที่เข้าใน R123 ทั้งนี้เนื่องจาก R113 ซึมผ่านเข้าไปในชิ้นงานได้มากกว่า R123 เพราะมีค่าความสามารถในการละลายมากกว่า สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแตกต่างเชิงมวลของชั้นทดสอบ ซึ่งมวลจะเพิ่มขึ้นภายหลังเวลาทำงาน 1000 ชั่วโมง เนื่องจากสารทำเย็นซึมผ่านเข้าไปสะสมในเนื้อโพลิเมอร์มากขึ้น ความแข็งแรงครากจึงต่ำกว่านั่นเอง



รูป 4.14 ความแข็งแรงครากของชิ้นทดสอบที่แช่ในสารทำเย็น R113 ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ (บริเวณแถบสี แสดงค่าความแข็งแรงครากของชิ้นทดสอบที่ไม่เจอสารทำงานใดๆ)

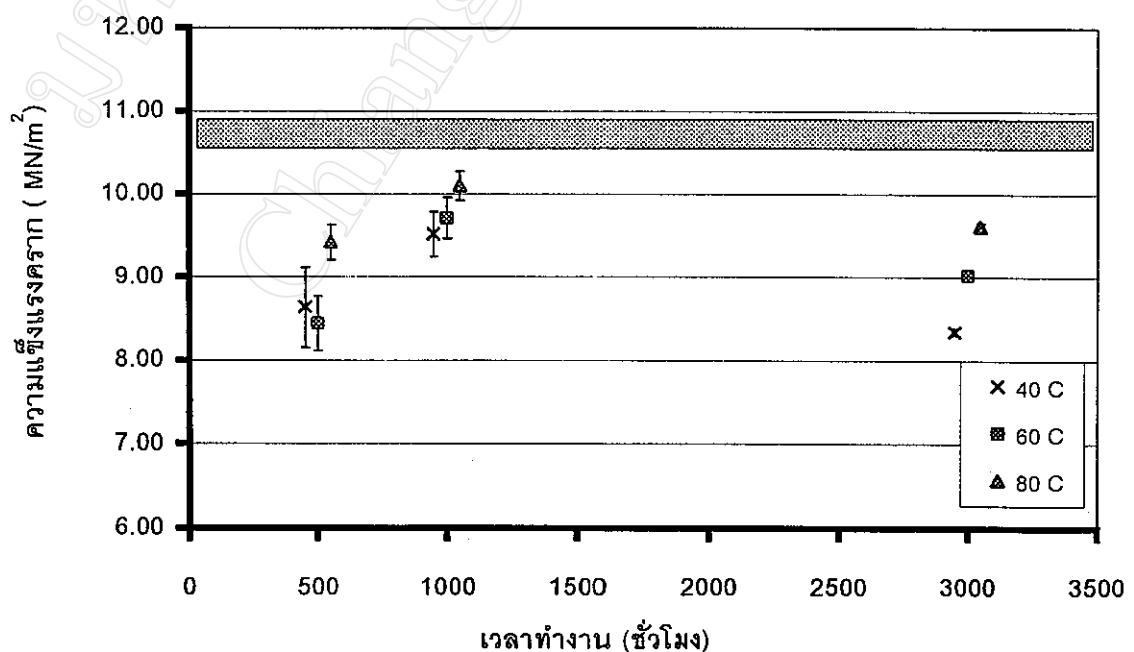


รูป 4.15 ความแข็งแรงครากของชิ้นทดสอบที่แช่ในสารทำเย็น R123 ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ (บริเวณแถบสี แสดงค่าความแข็งแรงครากของชิ้นทดสอบที่ไม่เจอสารทำงานใดๆ)

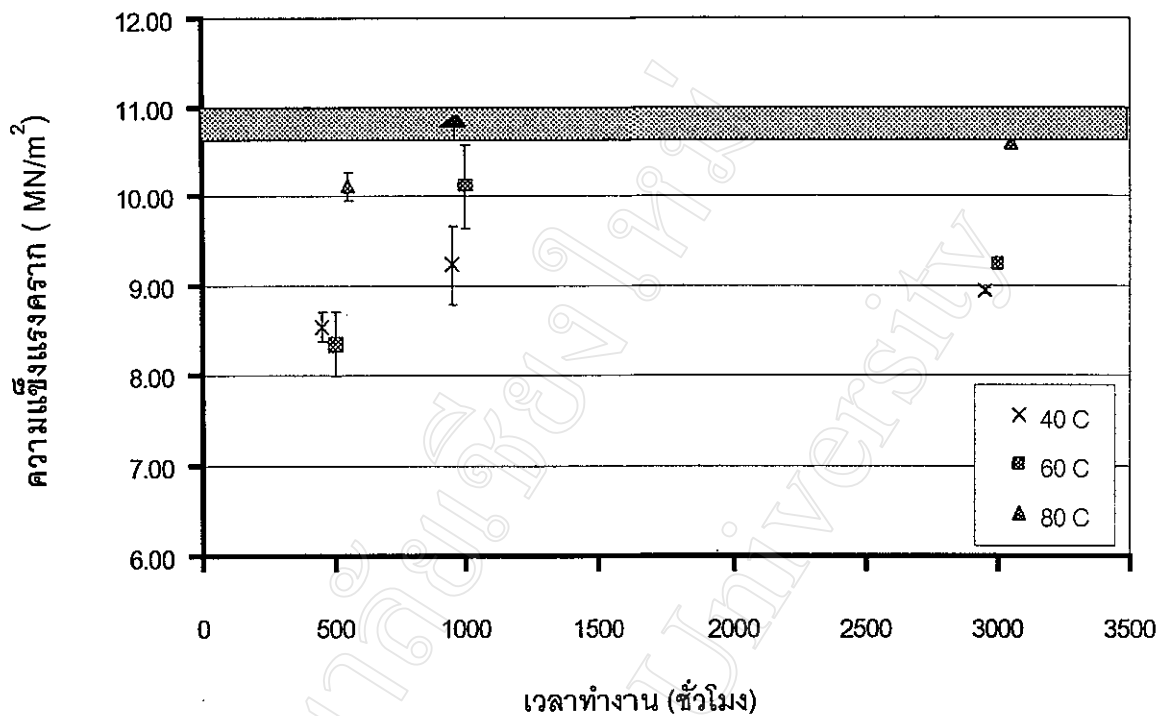
4.2.2 ชั้นทดสอบที่ตัดจากเทอร์โมไซฟอน

4.2.2.1 ผลของเวลาและอุณหภูมิทดสอบที่มีต่อค่าความแข็งแรงคราก

จากรูป 4.16 และ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบที่ตัดจากเทอร์โมไซฟอน ที่เวลาและอุณหภูมิทดสอบต่างๆ ที่ใช้สารทำเย็น R113 และ R123 ตามลำดับ แถบสีที่แสดงเป็นช่วงความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบที่ไม่ได้ผ่านการทำงานกับสารทำเย็นใดๆ แต่ทำการทดสอบที่สภาวะและอุณหภูมิเดียวกับเทอร์โมไซฟอนชุดการทดสอบอื่น จะเห็นได้ว่าความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบที่เวลา 500 1000 และ 3000 ชั่วโมงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยจะเริ่มลดลงภายหลังเวลา 1000 ชั่วโมง และพบว่าที่อุณหภูมิทดสอบ 80 °C มีค่าความแข็งแรงครากของของชั้นทดสอบสูงสุดและมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับชั้นทดสอบที่ 40 และ 60 °C ค่าความแข็งแรงครากที่ลดลงนี้มีแนวโน้มที่แตกต่างจากชิ้นงานที่แช่อยู่ในสารทำเย็น เนื่องจากมีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ปัจจัยที่ทำให้ความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบเทอร์โมไซฟอนแตกต่างจากชิ้นงานที่แช่อยู่ในสารทำเย็นนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยร่วมระหว่าง การเกิด Aging effect , Plasticization , Crystallization, Thermal stress ที่ค้างอยู่ในเนื้อชิ้นงาน หรือความดันภายในท่อ ซึ่งอยู่นอกเหนือจากขอบเขตการศึกษาครั้งนี้ และควรต้องศึกษาในรายละเอียดต่อไป สำหรับ R113 สามารถใช้งานได้ดีเป็นเวลา 1000 ชั่วโมง และ R123 สามารถใช้งานได้ถึง 3000 ชั่วโมง อุณหภูมิที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานกับเทอร์โมไซฟอน คือที่ 80 °C เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงครากสูงสุดและใกล้เคียงกับความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบมาตรฐาน



รูป 4.16 ความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบที่ตัดจากเทอร์โมไซฟอนที่ใช้สารทำเย็น R113



รูป 4.17 ความแข็งแรงครากของชิ้นทดสอบที่ตัดจากเทอร์โมไซฟอนที่ใช้สารทำเย็น R123 (บริเวณแถบสีแสดงค่าความแข็งแรงครากของชิ้นทดสอบที่ไม่เจอสารทำงานใดๆ)

4.2.2.1 ผลของฟลักซ์ความร้อนที่มีต่อค่าความแข็งแรงครากของชิ้นทดสอบ

จากรูป 4.16 และ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงครากของชิ้นทดสอบที่ตัดจากเทอร์โมไซฟอน ที่เวลาและอุณหภูมิทดสอบต่างๆ ที่ใช้สารทำเย็น R113 และ R123 ตามลำดับ โดยมีค่าฟลักซ์ความร้อนของการระบายอากาศที่ส่วนควบแน่นสูง ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงครากของชิ้นทดสอบที่ตัดจากเทอร์โมไซฟอนที่ผ่านค่าฟลักซ์ความร้อนสูงและต่ำ จะเห็นว่าแนวโน้มการลดลงของค่าความแข็งแรงครากไปในทางเดียวกัน คือจะมีค่าลดลงภายหลังเวลา 1000 ชั่วโมง แต่ที่ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงค่าความแข็งแรงครากของชิ้นทดสอบจะต่ำกว่าที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ เนื่องจากที่ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงมีการระบายความร้อนได้ดีกว่า ความร้อนจึงสะสมตัวอยู่ในเทอร์โมไซฟอนน้อยกว่า ความแข็งแรงครากจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อเทียบกับของเทอร์โมไซฟอนที่ค่าฟลักซ์ความร้อนต่ำ ซึ่งสอดคล้องกันที่ทุกเวลาและอุณหภูมิการทดสอบ ความสัมพันธ์ของความแข็งแรงครากที่ฟลักซ์ความร้อนต่ำ แสดงไว้ในภาคผนวก ข

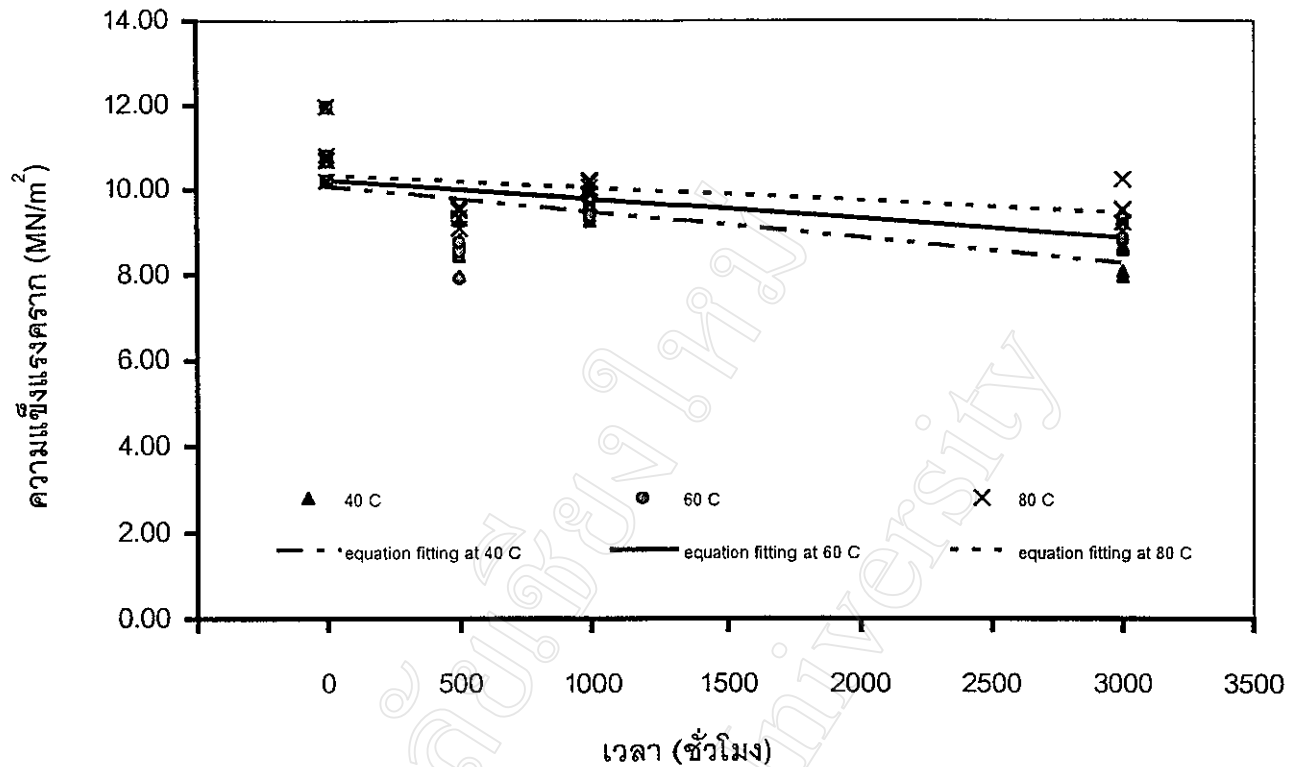
4.2.2.2 ผลของชนิดสารทำเย้นที่มีต่อค่าความแข็งแรงคราก

จะเห็นว่าชั้นทดสอบที่แช่ใน R113 จะมีค่าความแข็งแรงครากต่ำกว่าชั้นทดสอบที่แช่ใน R123 ทั้งนี้เหตุผลหนึ่งที่น่าจะเป็นไปได้ คือ เนื่องจาก R113 ซึมผ่านเข้าไปในชั้นงานได้มากกว่า R123 เพราะมีค่าความสามารถในการละลายใกล้เคียงกับของเอชดีพีอี สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแตกต่างเชิงมวลของชั้นทดสอบที่แช่ในสารทำเย้นทั้งสอง ซึ่งมวลจะเพิ่มขึ้นภายหลังเวลาทำงาน 1000 ชั่วโมง เนื่องจากสารทำเย้นซึมผ่านเข้าไปสะสมในเนื้อโพลิเมอร์มากขึ้น ความแข็งแรงครากจึงต่ำกว่านั่นเอง

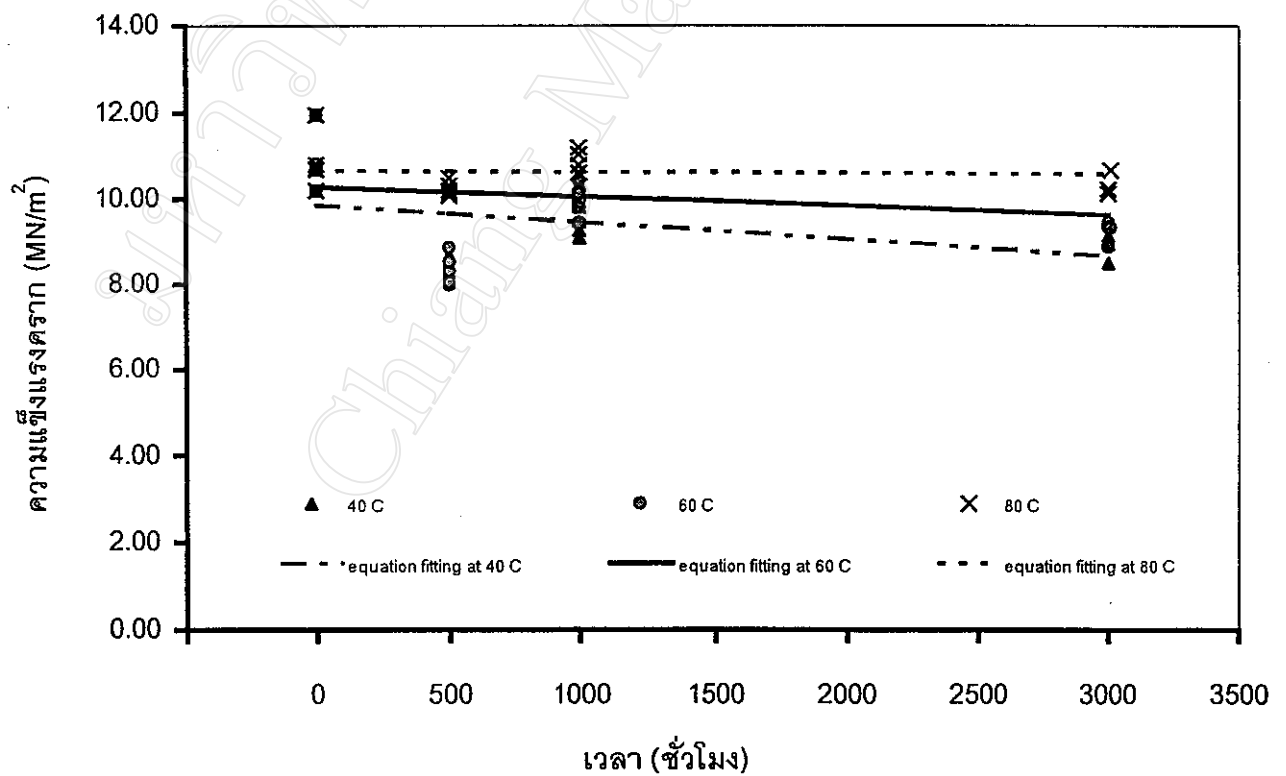
4.2 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษาอายุการใช้งานของเทอร์โมไซฟอน

ได้มีการใช้แบบจำลองของอาร์รีเนียสเพื่อทำนายผลความแข็งแรงของเปลือกท่อเทอร์โมไซฟอนในด้านการรับแรงดึง แต่ปรากฏว่าแบบจำลองดังกล่าวไม่สามารถสัมพันธ์เข้ากับข้อมูลความแข็งแรงครากที่ได้จากการทดสอบได้ เนื่องจากแบบจำลองของอาร์รีเนียสนั้นเหมาะกับข้อมูลการทดสอบที่เกิดขึ้นแบบสะสมตัวตามเวลาเท่านั้น อาทิ การกัดกร่อน การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน การแพร่ การคืบ หรือการเกิดก๊าซที่ไม่ควบแน่น เป็นต้น แต่จากผลการทดสอบหาค่าความครากของชั้นทดสอบที่ตัดมาจากเทอร์โมไซฟอนทั้งที่ใช้สารทำเย้น R113 และ R123 นั้น พบว่า ความแข็งแรงครากจะเพิ่มขึ้นตามเวลาเฉพาะในช่วงเวลาทำงาน 500-1000 ชั่วโมง แต่จะลดลงในช่วงเวลา 1000-3000 ชั่วโมง ซึ่งไม่สอดคล้องกับข้อจำกัดของแบบจำลองอาร์รีเนียสที่ข้อมูลการทดสอบจะต้องเกิดขึ้นแบบสะสมตัวตามเวลาเท่านั้น จึงได้ทำการเลือกใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่นๆ มาแทนแบบจำลองของอาร์รีเนียสดังกล่าว คือเลือกใช้การสร้างสมการเพื่อเป็นตัวแทนของข้อมูลที่ทำการศึกษา (Equation Fitting)

จากรูป 4.18 และ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ตามเวลาของความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบที่ตัดมาจากเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 และ R123 ที่อุณหภูมิต่างๆ ตามลำดับ



รูป 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบที่ตัดจากเทอร์โมไซฟอนที่ใช้สารทำเย็น R113 ที่เวลาและอุณหภูมิทดสอบต่างๆ



รูป 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงของชั้นทดสอบที่ตัดจากเทอร์โมไซฟอนที่ใช้สารทำเย็น R123 ที่เวลาและอุณหภูมิการทดสอบต่างๆ

สามารถสร้างสมการของเส้นกราฟความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบที่ตัดจากเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 จากข้อมูลการทดสอบที่แต่ละอุณหภูมิ (T) และเวลาทดสอบ (t) โดยเลือกขอบเขตของช่วงที่จะนำมาสร้างสมการ คือ เวลาทำงานในช่วง 500-3000 ชั่วโมง และอุณหภูมิทำงาน 40-80 °C จะได้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้ คือ

$$\sigma = -0.0006 t + 10.068$$

ที่อุณหภูมิ 40 °C

$$\sigma = -0.0004 t + 9.9394$$

ที่อุณหภูมิ 60 °C

$$\sigma = -0.0003 t + 10.334$$

ที่อุณหภูมิ 80 °C

สามารถสัมพันธ์ 3 สมการข้างต้น เพื่อสร้างสมการทั่วไปของความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบที่ตัดจากเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R113 ในเทอมของเวลาและอุณหภูมิทดสอบในช่วงขอบเขตที่กำหนดได้ดังนี้ คือ

$$\sigma = (9.802 + 0.00665T) - (0.0009 - 7.5 \times 10^{-6} T) t$$

ในขณะที่สมการเส้นโค้งของความแข็งแรงครากที่แต่ละอุณหภูมิของชั้นทดสอบที่ตัดจากเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 มีดังนี้ คือ

$$\sigma = -0.0004 t + 9.8566$$

ที่อุณหภูมิ 40 °C

$$\sigma = -0.0003 t + 9.9796$$

ที่อุณหภูมิ 60 °C

$$\sigma = -3 \times 10^{-5} t + 10.663$$

ที่อุณหภูมิ 80 °C

และสามารถสร้างสมการทั่วไปของความแข็งแรงครากของชั้นทดสอบที่ตัดจากเทอร์โมไซฟอนที่ใช้ R123 ในเทอมของเวลาและอุณหภูมิในช่วงขอบเขตที่กำหนดจากสมการความสัมพันธ์ทั้งสามข้างต้นได้ คือ

$$\sigma = (9.0502 + 0.02016T) - (0.0007 - 9.25 \times 10^{-6} T) t$$

สมการทั่วไปทั้ง 2 สมการดังกล่าวสามารถใช้ทำนายความแข็งแรงครากของเทอร์โมโซโฟนในช่วงอุณหภูมิทำงาน 40-80 °C และที่ช่วงเวลาทำงาน 500- 3000 ชั่วโมงได้ โดยค่าความเชื่อมั่นของสมการที่ได้จากการสร้างสมการเพื่อแทนข้อมูล (Confidential level of equation fitting) มีค่า 95 % และจะเห็นได้ว่าที่เวลาและอุณหภูมิการทดสอบเดียวกัน เทอร์โมโซโฟนที่ใช้ R123 จะมีความแข็งแรงครากสูงกว่าเทอร์โมโซโฟนที่ใช้ R113 โดยที่เวลาทำงาน 1000 ชั่วโมงและอุณหภูมิทำงาน 80 °C จะทำให้ความแข็งแรงครากของเทอร์โมโซโฟนทั้งที่ใช้ R113 และ R123 มีค่าสูงสุด